



CIRAD-Forêt

IDEFOR

Département Forestier

Bingerville - ABIDJAN - Anguédédou
République de Côte d'Ivoire

FORMATION A LA VALORISATION ENERGETIQUE DE LA BIOMASSE LIGNOCELLULOSIQUE

En collaboration avec le

**PÔLE REGIONAL AFRICAIN
DE THERMOCHIMIE**



Ademe



IEPF



LA GAZEIFICATION : ASPECTS THEORIQUES ET TECHNOLOGIE MISE EN OEUVRE

Pascal Corte - François Pinta

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, Basse Normandie, France.
Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement,
Montpellier, France.

1 - INTRODUCTION

La plupart des auteurs situent les origines de la technique de la gazéification à la fin du 18ème siècle ou au début du 19ème siècle. Les années 1810 à 1850 voient naître les premières applications concrètes : éclairages urbains au "gaz de ville" produit par gazéification de charbon minéral (Londres, Baltimore...). Il faut cependant attendre le début du 20ème siècle pour voir apparaître le premier gazogène sur véhicule. Cette époque constitue un véritable tournant pour la technologie de gazéification. L'emploi des gazogènes s'étend alors de l'Europe (France, Angleterre, Allemagne,...) aux Etats-Unis. Les gazogènes à bois et à charbon de bois sont alors développés.

Suite aux problèmes d'approvisionnement pétroliers, la seconde guerre mondiale est la période où l'on construit le plus de gazogènes. Ainsi en 1942, on compte près d'un million d'unités installées sur véhicules dont plus du tiers circulaient en Allemagne (350 000). Les autres pays utilisateurs étaient la France, le Japon, l'URSS (environ 100 000 unités chacun) et également la Suède qui comptait alors 74 000 unités. Après 1945, certains véhicules équipés de gazogène continuent à rouler mais le retour des carburants pétroliers (essence, gaz naturel,...) fait tomber la gazéification en désuétude.

La gazéification du bois et du charbon de bois a donc fait l'objet d'une longue expérience, principalement en Europe. Cette technologie a été redécouverte à l'occasion du 1er choc pétrolier en 1974 et la décennie 74-84 a vu le lancement de programmes importants, visant la maîtrise de la gazéification et le développement de toutes ses applications (production de chaleur, alimentation des moteurs thermiques, produits de synthèse).

La gazéification des combustibles solides a un champ d'application très vaste. Son intérêt pour la valorisation énergétique de la biomasse est des plus évidents. Elle permet de s'affranchir des contraintes liées aux combustibles solides : grande variabilité des caractéristiques physico-chimiques, de la granulométrie, de la composition, du pouvoir calorifique, et le gaz produit est facilement utilisable :

- il brûle dans des moteurs à combustion interne classiques au prix de modifications raisonnables,

- dans le cas de la combustion en chaudière, il permet de garantir de bons rendements énergétiques,
- il permet enfin de produire des carburants de synthèse ou des produits de base pour la chimie.

Ces trois grands types d'utilisation font appel à des procédés différents qui sont arrivés à des niveaux de développement distincts :

- la fabrication de gaz pauvre par gazéification à l'air pour une utilisation en moteur (production de force motrice ou d'électricité) a atteint un degré de maturité compatible avec une diffusion du procédé.
- l'utilisation du gaz pauvre pour la production de chaleur apparaît comme la solution d'avenir permettant de tirer le meilleur parti de la combustion de la biomasse. La décomposition de la combustion en une phase de gazéification, puis la combustion des gaz en chaudière permet d'atteindre des températures de foyers plus importantes que dans le cas de combustion directe et d'améliorer ainsi le rendement de récupération des chaudières. Cette approche est effectuée de façon convergente par des constructeurs de chaudières proposant des systèmes à avant-foyer, ou foyer semi-gazogène et par des constructeurs de gazogènes initialement prévus pour l'alimentation de moteurs et adaptés pour être raccordés à des chaudières. Ces procédés que l'on peut espérer opérationnels à court terme, devraient permettre la diffusion de la technologie de gazéification.
- La génération de produits de base pour l'industrie chimique et particulièrement pour la synthèse de carburants de substitution, correspond à une voie envisageable à plus long terme:
 - . la gazéification de la biomasse à l'oxygène et en présence de vapeur d'eau permet d'obtenir un gaz de synthèse pour la production de méthanol,
 - . des travaux de laboratoire montrent que la fabrication d'éthylène et d'acétylène est possible par gazéification à haute température.

2 - LES DIFFERENTS MODES DE GAZEIFICATION

2.1 - DEFINITIONS

La gazéification du bois est une transformation thermochimique qui consiste à décomposer thermiquement en présence d'un gaz réactif (air, O_2 , H_2 , etc...) le matériau solide initial pour obtenir des produits gazeux .

Par comparaison, rappelons que la pyrolyse est une transformation thermochimique se déroulant en atmosphère aussi inerte que possible. A l'inverse de celle-ci, qui produit à la fois du charbon, des pyroligneux et des gaz, la gazéification permet d'obtenir essentiellement des molécules simples de gaz (H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , etc...).

Dans les faits, la gazéification est une réaction complexe, au cours de laquelle, le bois est successivement chauffé, séché et pyrolysé pour produire d'abord du gaz et du charbon, qui

réagissent ensuite entre eux et avec un agent de gazéification (gaz réactif).

Les réactions complexes auxquelles ils donnent lieu sont plus ou moins équilibrées et leur déplacement (influence de la température, de la pression, de la nature des gaz réactifs) permet de modifier la composition du gaz obtenu (proportions relatives en molécules de gaz simple).

La gazéification est un processus globalement endothermique.

2.2 - LES DIFFERENTS GAZ ESCOMPTABLES

Les différents types de gaz obtenus par gazéification sont généralement classés en trois catégories en fonction de leur composition et de leur pouvoir calorifique (Tableau 1). Ces compositions dépendent de la cinétique et de la température de réaction (de décomposition) du combustible.

	Composition (% vol)						PCI (MJ/Nm ³)
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	CnHm	N ₂	
Gaz pauvre	20	24	13	3	-	40	4 à 7
Gaz à moyen PC	26	51	6	13	3	-	9 à 15
Gaz à haut PC	-	-	1	81	4	14	20 à 36

Source : X.DEGLISE et P.MAGNE - 1984

Tableau 1 : Différents types de gaz obtenus par gazéification

2.2.1 - Gaz pauvre (3,5 - 7 MJ/m³)

L'air est l'agent de la gazéification (fig.1) et le bas pouvoir calorifique est dû à la présence d'azote.

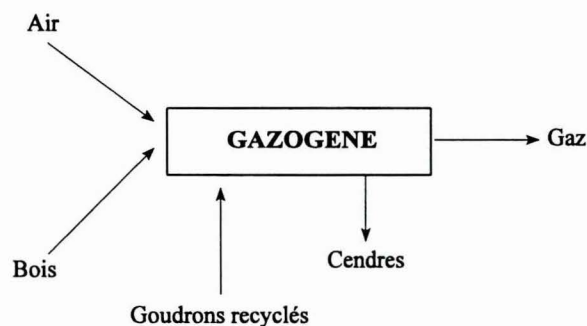


Figure 1 : Gaz pauvre (Source : X.DEGLISE et P.MAGNE - 1984)

De part sa simplicité, c'est ce type de gazéification qui a permis le large essor de la filière sur les véhicules dans les années 40 et qui aujourd'hui s'avère adapté à la fourniture de force motrice et de chaleur dans les petites industries, les villages et les sites isolés.

2.2.2 - Gaz à moyen pouvoir calorifique (9-15 MJ/m³)

Différents types de gaz à moyen PCI peuvent être obtenus soit en mettant en oeuvre des procédés de pyrolyse (action de la chaleur en absence d'air - fig. 3), soit en utilisant d'autres fluides de gazéification comme la vapeur d'eau ou l'oxygène pur (fig. 2).

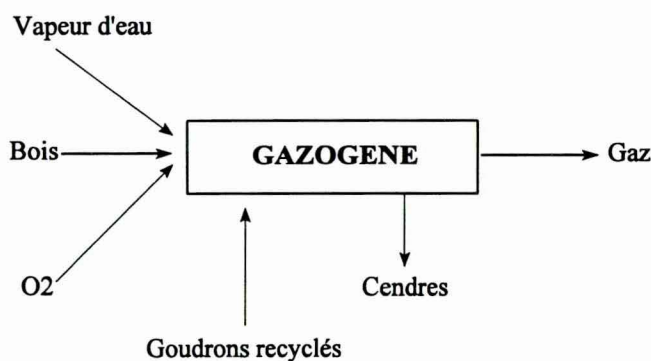


Figure 2 : Gaz à moyen pouvoir calorifique (Source : X.DEGLISE et P.MAGNE - 1984)

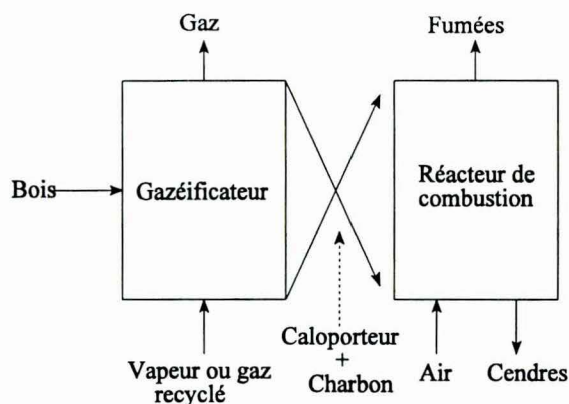


Figure 3 : Procédé à lit fluidisé (Source : X.DEGLISE et P.MAGNE - 1984)

Ce gaz à moyen pouvoir calorifique, appelé également gaz de synthèse, peut être utilisé pour la synthèse du méthanol, de l'essence (Fischer-Tropsch), comme du gaz naturel ou de l'ammoniac, etc.

Essentiellement développée à partir du charbon minéral, cette gazéification a permis et permet encore aujourd'hui de produire du méthanol et des combustibles liquides dérivés. Elle a fait l'objet dans les années 80 de nombreux programmes pilote (1 à 5 MW) visant la production de méthanol à partir de la biomasse lignocellulosique. La mauvaise compétitivité de la filière

"Biométhanol" par rapport aux carburants pétroliers a entraîné l'abandon momentané des programmes correspondants.

Les acquis sont cependant importants en matière de procédés mais n'ont toutefois pas débouchés sur des réalisations.

2.2.3 - Gaz à haut pouvoir calorifique (20-36 MJ/m³)

Ce gaz est principalement destiné à se substituer au gaz naturel. Il est normalement produit par méthanisation à partir du gaz à moyen pouvoir calorifique, mais on étudie également des procédés destinés à le produire directement par gazéification du bois (fig. 4) à l'hydrogène.

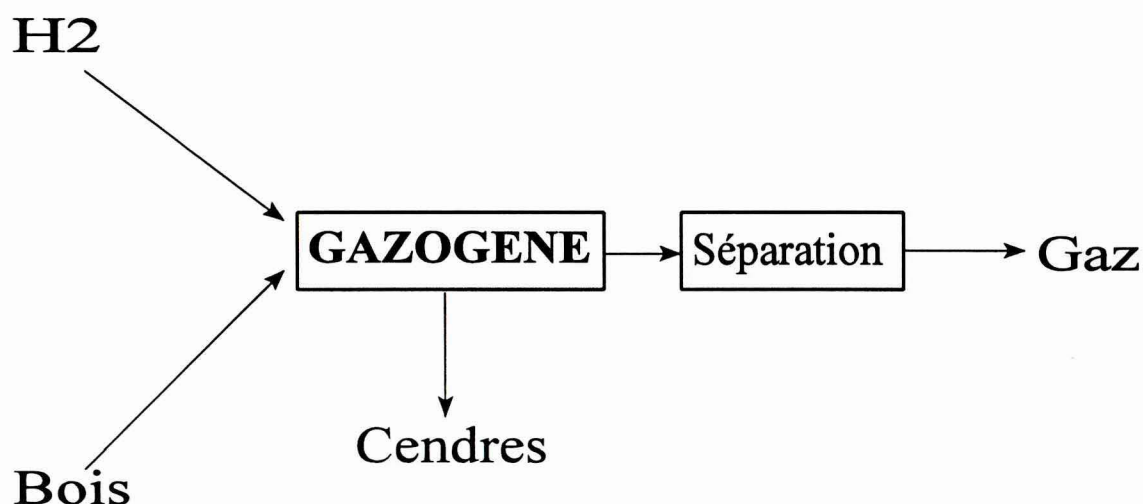


Figure 4 : Gaz à haut pouvoir calorifique (Source : X.DEGLISE et P.MAGNE - 1984)

Sa production a fait l'objet de divers programmes de recherches dans les années 70-80. Les programmes sont aujourd'hui abandonnés ou mis en veilleuse, toujours pour un problème de compétitivité de la filière.

La suite du présent document traite plus particulièrement de la gazéification à l'air qui constitue aujourd'hui la seule voie industrielle opérationnelle (techniquement mature) et commercialisable (économiquement intéressante dans les contextes les plus favorables).

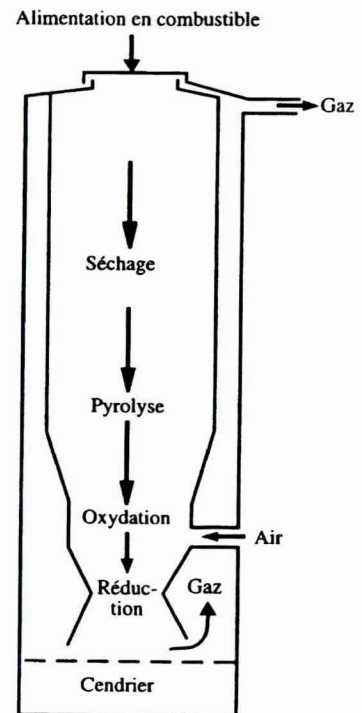
3 - LES MECANISMES FONDAMENTAUX DE LA GAZEIFICATION A L'AIR

3.1 - PRINCIPE

Les mécanismes fondamentaux de la gazéification à l'air sont présentés à partir du principe de fonctionnement du gazogène à lit fixe et à tirage inversé. Ce type de générateur fut développé par l'ingénieur IMBERT et plusieurs centaines de milliers d'exemplaires furent utilisés pendant la seconde guerre mondiale. Il constitue la base des gazogènes aujourd'hui commercialisés.

Il s'agit d'un gazogène à bois comprenant deux cuves concentriques ; la cuve centrale constituant le réacteur et la cuve extérieure jouant le rôle d'échangeur de chaleur (fig. 5).

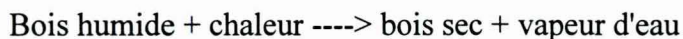
Figure 5 : Schéma du générateur IMBERT (d'après BARTHELEMY, 1982)



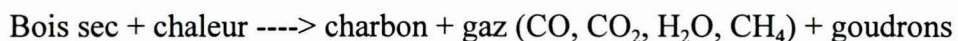
3.2 - LES DIFFERENTES REACTIONS DE LA GAZEIFICATION A L'AIR

Dans la cuve centrale, cylindro-conique, le combustible traverse quatre zones successives :

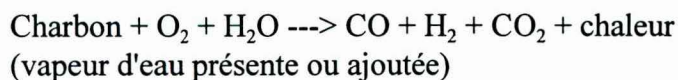
- la zone de séchage entre 100 et 200 °C :



- la zone de pyrolyse entre 200 et 800 °C :



- la zone d'oxydation entre 800 et 1200 °C, où le carbone du charbon de bois ainsi que les produits volatiles dégagés dans la zone de pyrolyse sont craqués totalement ou partiellement en présence de l'air distribué par les tuyères :



- la zone de réduction constituée d'une couche de charbon incandescent où les molécules de carbone, de dioxyde de carbone et d'eau, entre autres, sont transformées en monoxyde de carbone, en hydrogène et en méthane.

Le gaz quitte ensuite la zone de réduction et entre dans la cuve extérieure. Il remonte cette double enveloppe en se refroidissant par transfert de chaleur vers la cuve centrale et vers l'extérieur.

Ces différents processus ont lieu dans des zones bien déterminées du réacteur pour les gazogènes à lit fixe ou lit mobile. Il n'en est pas de même pour les gazogènes à lit fluidisé où ils ont lieu simultanément au sein du réacteur.

4 - LES PROCÉDES DE GAZEIFICATION

Les quelques cent cinquante ans de développement de la filière ont abouti à l'émergence de nombreux procédés mettant en oeuvre selon la granulométrie des particules à gazéifier des gazogènes soit à lit fixe, soit à lit mobile, soit à lit fluidisé.

Il serait difficile et loin de notre propos de passer en revue tous les générateurs développés par le passé. Aussi nous nous intéresserons ici à quelques générateurs typiques des voies les plus prospectées et d'avenir pour la gazéification de la biomasse.

4.1 - LES GÉNÉRATEURS A LIT FIXE

Dans ces générateurs, le combustible descend très lentement, par gravité, du haut du générateur vers le foyer (§ 31). Ces générateurs développés pour la gazéification à l'air sont les plus couramment proposés pour la production de chaleur, comme pour l'alimentation des moteurs thermiques. On les classe selon le mode de tirage (inversé, transversal, ou à contre-courant) :

- Tirage inversé :

Les gazogènes du type Imbert sont les plus courants et les plus commercialisés, il est décrit au § 31. Le gros avantage du gazogène à tirage inversé est sa simplicité. Différents gazogènes de ce type, d'une puissance allant jusqu'à 200 kW permettent la production de gaz pauvre de bonne qualité. En revanche, pour les puissances supérieures à 200 kW, des problèmes d'écoulement du combustible se posent souvent, de plus, le diamètre de la cuve est important de sorte que l'air injecté à la périphérie du foyer est difficilement réparti jusqu'au centre, ce qui peut créer une zone pas assez chaude pour craquer tous les goudrons, que l'on risque de retrouver dans le gaz produit. Les gazogènes ouverts ou "open core", fonctionnant également sur le principe du tirage inversé, ont aussi été employés soit pour des combustibles pulvérulents (balle de riz, tourbe) soit pour des puissances plus importantes.

Les générateurs à lit fixe et à tirage inversé correspondent cependant aux types de gazogènes qui ont été et qui restent les plus développés dans le monde.

- **Tirage transversal ou horizontal** (figure 6) :

Le courant de gaz est perpendiculaire au sens d'écoulement du combustible. L'entrée d'air et la sortie du gaz sont au même niveau. L'air injecté par une tuyère à très grande vitesse, crée une zone de réaction de volume très restreint, mais extrêmement chaude puisque la fusion des cendres y est totale.

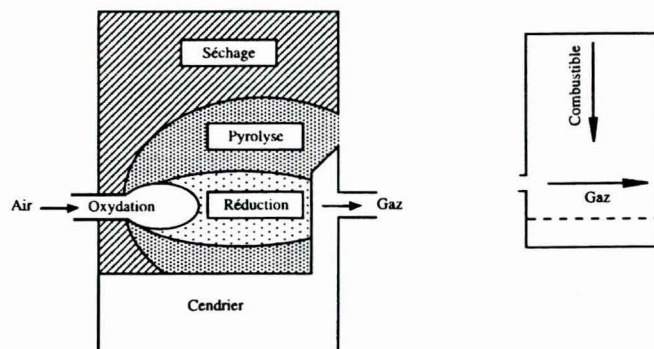


Figure 6 : Schéma du générateur à tirage transversal (d'après SKOV, 1974)

Ce principe très simple est particulièrement adapté à la gazéification du charbon de bois et a eu une grande vogue pour les petites puissances (de l'ordre de 20 kW) pendant la dernière guerre mondiale.

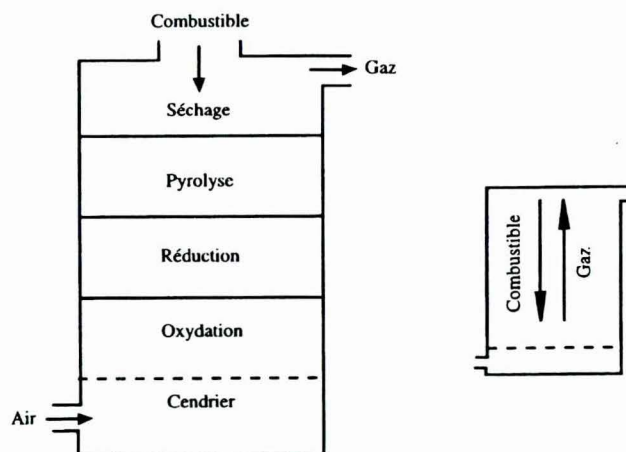
Son utilisation a été réanimée dans les années 80, notamment en France par le CEMAGREF, avec pour objectif de doter les PVD de groupes électrogènes et de motopompes simples à construire et à maîtriser.

On peut retenir également que l'utilisation de charbon de bois dans ce type de gazogène limite fortement les problèmes de traitement des gaz (filtration), mais diminue le rendement énergétique de la filière et ses performances économiques.

- **Tirage direct (ou à contre-courant)**

Dans le gazogène à tirage direct, le combustible introduit par le haut du générateur, traverse successivement les zones de séchage, de pyrolyse et de réduction avant de pénétrer dans le foyer tandis que le gaz produit remonte toutes ces zones à contre-courant du combustible (figure 7).

Figure 7 : Schéma d'un générateur à tirage direct (d'après KOV, 1974)



4.2 - LES GENERATEURS A LIT FLUIDISE

Ce type de générateurs a été largement développé pour la production de gaz de synthèse (production de méthanol) à partir du charbon minéral (procédé WINCKLER,...).

La voie a aussi été développée au stade pilote et pré-industriel pour la biomasse avec le même objectif. Elle fait l'objet d'un regain d'intérêt pour l'alimentation de turbines de petite à moyenne puissance (plusieurs projets lourds en cours de financements).

STASSEN (1985) définit le lit fluidisé comme un volume de particules granuleuses que traverse, de bas en haut, un courant de gaz. Dans un générateur à lit fluidisé, l'ajustement de la vitesse de l'air permet le maintien du combustible dans le lit dont le support inerte est généralement du sable. Idéalement, le mélange "gaz/combustible/support" se comporte comme un liquide homogène (Fig. 8).

Cette technologie permet la gazéification de combustibles de tous genres, y compris les déchets ménagers à haute teneur en matières minérales.

Pour éviter la fusion des cendres au sein du lit, les réacteurs expérimentés fonctionnent à basse température $\approx 800^{\circ}\text{C}$. La recherche de matériaux de lit ayant un effet catalytique, l'utilisation de filtres céramiques travaillant à chaud et l'association éventuelle d'une étape de catalyse pour craquer les goudrons se formant lors de la gazéification devraient permettre de résoudre les problèmes de filtration des gaz avant leur utilisation en turbine à gaz.

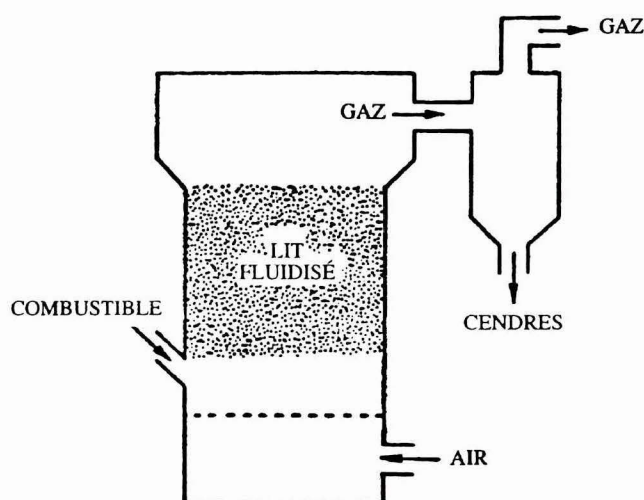


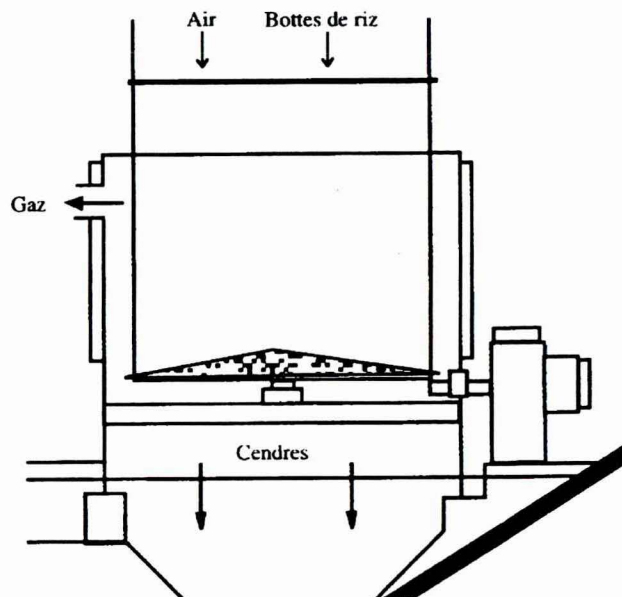
Figure 8 : Schéma d'un générateur à lit fluidisé (d'après MILLER, 1983)

4.3 - LES GENERATEURS A LIT MOBILE

Dans les générateurs à lit mobile, le combustible est maintenu perpétuellement en mouvement. Ces équipements sont étudiés pour la gazéification des matières "pulvérulentes" que l'on cherche à valoriser au plan énergétique. Parmi les voies prospectées, la plus prometteuse correspond **aux générateurs à lit brassé** étudiés pour la gazéification de biomasse de faible granulométrie et à haute teneur en matières minérales, comme la balle de riz. Le principe est basé sur un brassage permanent de la matière afin que la fusion des cendres n'induisse pas la formation de mâchefers.

Dans le cas du générateur représenté ci-dessous, le mouvement de la matière est assuré par la rotation de la grille. Certains générateurs sont équipés de palles fixées autour d'un axe central afin de réaliser un brassage plus intime. Ces configurations n'ont toutefois pas permis d'arriver à une réalisation fiable.

Figure 9 : Schéma d'un générateur chinois à lit brassé pour la balle de riz (d'après KAUPP, 1984)



5 - LA PRATIQUE DES GAZOGENES

Le recours à la technique de gazéification peut être envisagé pour assurer des productions de chaleur de faible à moyenne puissance (quelques dizaines de kW à quelques centaines de kW), et pour assurer la production de force motrice (et d'électricité) à des niveaux de puissances allant de 20 à 200 kW.

5.1 - PRODUCTION THERMIQUE

La production de chaleur, par alimentation d'un brûleur à gaz pauvre apparaît moins sensible à la présence de goudrons que la production d'électricité par groupe moto-alternateur : la filière thermique devrait être plus simple à mettre en oeuvre dans de bonnes conditions (moins de contraintes sur la qualité du gaz, sur les caractéristiques de la matière première (humidité, taux de matière minérale). Cela permet une flexibilité intéressante :

- conditions de gazéification moins draconiennes (outils plus rustiques),
- gazéification à plus faible température permettant l'utilisation de biomasse à forte teneur en minéraux.

Le bois, mais aussi la balle de riz sont utilisés avec succès (par exemple en Thaïlande). Pour la production de chaleur, la gazéification entre cependant en concurrence avec la combustion directe, plus aisée à maîtriser et qui s'accommode mieux de techniques rudimentaires.

5.2 - LA FORCE MOTRICE (PRODUCTION ELECTRIQUE)

La production de force motrice n'est développée avec succès au niveau industriel que pour de petites puissances et cela essentiellement à partir de bois séché (Humidité < 20 % sur brut) et de charbon de bois. L'utilisation de briquettes de résidus agricoles séchés et densifiés est également envisageable pour autant, qu'après densification, le produit reste économiquement compétitif, ce qui est rarement le cas.

Les principales contraintes de mise en oeuvre portent sur :

- la matière première qui doit être de qualité régulière, sèche et calibrée,
- les opérations de maintenance qui sont faciles mais fréquentes et assez importantes.

Ces contraintes, associées au coût des équipements (aujourd'hui produits à l'unité) et aux problèmes de service-après-vente font que la filière se développe très lentement. Les derniers développements en matière de filtration des gaz et de régulation laissent cependant espérer dans les pays en développement un essor à court terme, à condition que les efforts indispensables à la mise en oeuvre d'un environnement satisfaisant soient consentis ce qui implique nécessairement une contribution de la Communauté Internationale.

Au plan économique, tant que la mise en oeuvre de séries suffisantes n'aura pas permis de ramener les prix des équipements à un niveau satisfaisant, la filière ne passe que dans les cas les plus favorables (matière première de qualité optimale et gratuite, environnement privilégié, durée de fonctionnement maximale chaque année, prix élevé des combustibles pétroliers).

Dans tous les cas, les groupes gazo-électrogènes exigeront des investissements plus lourds du fait du faible pouvoir calorifique du gaz (moteur de grosse cylindrée), de la nécessité de le filtrer (chaîne de filtration etc), qui alourdissent leur coût par rapport aux groupes électrogènes diesels souvent par un facteur 3.

Les contraintes de maintenance risquent aussi de peser lourdement dans les décisions, même si le coût de la main d'oeuvre en PED n'est pas rédhibitoire pour la technologie. La liste des opérations de maintenance prévue sur un groupe gazo-électrogène de 40 kW fonctionnant 8 h par jour illustre bien la situation de cette technologie en égard à sa mise en oeuvre.

. Chaque jour :

- Evacuation des cendres du cendrier
- Purge du réservoir de jus pyroligneux
- Vérification du niveau d'eau dans le lavoir
- Purge du détendeur
- Purge du filtre à liège
- Purge du filtre papier
- Vérification du niveau d'huile et d'eau du moteur
- Purge du collecteur d'admission
- Chargement du bois.

. Chaque 50 heures :

- Nettoyage de la grille
- Nettoyage des conduits d'évacuation des jus pyroligneux et des parois de la trémie
- Vérification des portes (fermeture hermétique)
- Nettoyage :
 - . du détendeur
 - . du laveur
 - . du filtre liège
 - . du papier filtrant,

6 - LA SITUATION ACTUELLE

Les **gazogènes à lit fluidisé** ont surtout été développés ces dernières années dans les pays nordiques (Finlande, Suède). Ils ont donné lieu à différents pilotes. Une unité de démonstration est maintenant en fonctionnement en Suède (Vamamø) et produit 6 MWe dans un système de production d'électricité à cycle combiné. Plusieurs autres projets de démonstration sont en cours de développement en Europe (Italie, Danemark, Angleterre) dans les mêmes ordres de grandeur de puissance.

Des travaux ont aussi été menés en France par Creusot Loire, notamment pour la production de gaz de synthèse, mais aussi de gaz pauvre en grosse puissance (> 9 MW). Le pilote industriel correspondant était encore opérationnel en 1991.

Actuellement, les seuls gazogènes disponibles sur le marché avec un niveau de fiabilité industriels satisfaisant correspondent à des **ensembles à lit fixe et à tirage inversé** dans une gamme de puissance permettant l'alimentation d'un groupe moto-alternateur jusqu'à 200 KW électrique ou d'un brûleur à gaz jusqu'à 600 KW thermique.

De nombreuses réalisations industrielles ont été réalisées dans la décennie 75-85 notamment aux Etats-Unis (Université de Davis en Californie ou Solar Energy Research Institute dans le Colorado), en Hollande (Twente University), en Grande Bretagne (Shell en collaboration avec Twente University), en Allemagne (Firme Imbert) et surtout en France (Firme Duvant et plus récemment Genetrans, Chevet et Touillet).

Pour les gazogènes de petites puissances bien conçus, on arrive à éliminer les goudrons au moins dans le cas d'un fonctionnement stabilisé avec de la biomasse sèche (humidité inférieure à 20%). Les contraintes liées à la matière première jointes à la nécessité d'un entretien rigoureux de l'installation gazo-électrogène restent un frein important au développement de la gazéification.

7 - CONCLUSION

La gazéification de la biomasse solide est un procédé très intéressant sur le plan technique qui permet la production fiable soit d'énergie thermique, soit de force motrice (pompage pour l'irrigation, production d'électricité). Ce procédé est particulièrement adapté à de petits niveaux de puissance ($20 < P < 200$ kW). Différents suivis d'installations ont permis de calculer de bons rendements énergétiques et ont démontré une bonne souplesse de fonctionnement.

Malheureusement les contraintes de cette technologie sont également importantes : un niveau élevé d'investissement (3 à 5 fois celui des énergies fossiles), la nécessité d'une matière première calibrée et de qualité régulière, et un besoin en maintenance très important (nombreuses interventions quotidiennes, cependant facile à réaliser).

Seuls les contextes particuliers où le coût des énergies traditionnelles est très élevé (cas de certains sites isolés) justifient économiquement la mise en place d'installations gazogènes. Le fonctionnement durable de telles unités nécessite impérativement un suivi (entretien et maintenance) rigoureux de la part de personnels très motivés.